

Коммунальное хозяйство городов

1.Самойленко Н.И., Гавриленко И.А. Функциональная надёжность трубопроводных транспортных систем / Под ред. Н.И.Самойленко. – Харьков: ХНАМГ; Горловка: ЧП «Вид-во Ліхтар», 2008. – 180 с.

2.Гавриленко И.А., Самойленко Н.И. Анализ методов оценки надёжности трубопроводных транспортных систем в автоматизированных системах управления // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.63. – К.: Техніка, 2005. – С.195-199.

3.Рудь И.А. Методы, критерии, и алгоритмы принятия решений по эксплуатации и развитию инженерных сетей с учётом их надёжности: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.06. – Харьков, 2001. – 153 с.

4.Рудь И.А. Расчет надёжности технических систем с мостовым соединением элементов // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.20. – К.: Техніка, 1999. – С.37-42.

5.Ильин Ю.А. Надёжность водопроводных сооружений и оборудования. – М.: Стройиздат, 1985. – 240 с.

Получено 10.12.2008

УДК 621.3.032

К.К.НАМИТОВ, д-р техн. наук

Харьковская национальная академия городского хозяйства

ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПУСКРЕГУЛИРУЮЩИХ АППАРАТОВ ДЛЯ РАЗРЯДНЫХ ЛАМП

Приводится краткий упрощенный метод анализа теплового режима работы балластного дросселя, комплектов «РЛ - ПРА», который можно использовать в инженерной практике при проектировании.

Математически строгая постановка задач о тепловом режиме работы пускорегулирующих аппаратов (ПРА) приводит к нелинейным уравнениям нестационарной теплопроводности со сложными условиями однозначности [1-4].

Ниже концептуально рассматривается упрощенный подход к этой проблеме, приемлемый в инженерной практике.

В действующем аппарате выделение тепла связано с потерями электрической энергии на лент-джоулев нагрев токоведущих частей [1-3], на перемагничивание и вихревые токи в ферромагнитных частях. Тепло передается от одних частей аппарата к другим, отдается в окружающую среду. В результате возникает существенно неравномерное температурное поле, для различных точек которого характерна собственная динамика повышения температуры. После выхода аппарата на заданный рабочий режим за определенное время в нем устанавливается стационарное температурное поле, для каждой точки которого характерно определенное значение температуры.

Максимально допустимый перегрев аппарата устанавливается в

соответствии с заданным сроком службы и указывается в технических условиях. После отключения рабочего тока аппарата температура его частей постоянно выравнивается и приближается к температуре окружающей среды.

Под воздействием повышенной температуры в конструктивных элементах аппарата, особенно в его электрической изоляции, протекают различные процессы «старения», неизбежно приводящие к существенному нарушению функций аппарата и его выходу из строя. Этим обусловлена упомянутая выше связь между тепловым режимом и сроком службы электрического аппарата. Поэтому учет характера температурного поля, возникающего в действующем электрическом аппарате в реальных условиях его эксплуатации, при конструировании аппарата имеет большое практическое значение.

Существенное упрощение задачи количественного описания температурного поля действующего электрического аппарата в нестационарном тепловом режиме достигается при отказе от учета неравномерности этого поля внутри отдельных металлических элементов аппарата, разделенными тонкими диэлектрическими прослойками. При таком упрощенном теоретическом подходе каждому цельнометаллическому элементу приписывается зависящая от времени температура $T_i(t)$, где $i=1,2, \dots, n$, n – число элементов, на которое можно подразделить аппарат заданной конструкции, а время t отсчитывается от момента включения рабочего тока аппарата. В установившемся тепловом режиме все T_i приближаются к соответствующим стационарным значениям $T_i^{(v)}$. Основанием для такого подхода являются большие значения коэффициента теплопроводности X для металлов, используемых при изготовлении электрических аппаратов, и соответственно малые градиенты температуры $\Delta T/\Delta l$, возникающие в элементах аппаратов с не очень большими габаритами.

Сделаем ориентировочные оценки на основе известного выражения для удельного потока тепла q вида:

$$q = \frac{\lambda \Delta T}{\Delta l}. \quad (1)$$

Пусть, например, в действующем электрическом аппарате низкого напряжения выделяется тепловая мощность $P \approx 10$ Вт, площадь поперечного сечения этого аппарата $S \approx 1$ см². Тогда максимальное значение q_{\max} в этом элементе составляет $q_{\max} \frac{P}{S} \approx 10^5$ Вт/м². Этому со-

ответствует максимальный градиент температуры $\left| \frac{\Delta T}{\Delta l} \right|_{\text{макс}} \approx 10^3 \text{ К/м.}$

При $\lambda \approx 10^2 \frac{\text{В}}{\text{м} \times \text{К}}$ на длине элемента $\Delta l \approx 1 \text{ см}$ возникает разность температур не более $\Delta T_{\text{макс}} \approx 10 \text{ К}$ (фактически величина ΔT будет еще меньше, а оценка температурного поля с точностью 5-10 К может быть достаточной в инженерной практике).

Таким образом, при упрощенном подходе аппарат может рассматриваться как совокупность L_i ($i = 1, 2, \dots, n$) элементов с температурами $T_i(t)$, между которыми имеет место теплообмен в местах «теплового контакта» через тонкие слои воздуха или иного диэлектрика. Как показано схематически на рис.1, на токоведущем элементе 1 (обмотке), ферромагнитном элементе 2 (сердечнике, на который навита обмотка) имеет место непосредственное выделение тепловой мощности (P_1 и P_2 соответственно) от внешнего источника электрического питания; другие «пассивные» элементы с номерами 3, 4, ..., n (порядок следования которых соответствует условию $T_3 > T_4 > \dots > T_n$) воспринимают тепло от предыдущих (по нумерации) элементов (в частности от 1 и 2) и передают его последующим элементам, как показано на рис.1. «Последний» элемент $i=n$ с минимальной температурой обязательно контактирует с окружающей средой, а другие элементы могут и не контактировать с ней (пример такой ситуации приведен на рис.2, в). На рис.1 процессы теплопередачи, которые обязательно имеют место в действующем аппарате, показаны сплошными стрелками, а те, которые возможны – пунктирными.

Коэффициенты теплоотдачи от элементов в окружающую среду обозначены, а между отдельными элементами – α_{ik} ($i \neq k$). Эти величины поддаются приближенной теоретической оценке. При сравнительно невысоких температурах нагрева действующих аппаратов основным механизмом теплоотдачи от внешних поверхностей аппарата обычно является свободная конвекция. По закономерностям конвективного теплообмена установлены выражения, позволяющие оценить коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции в определенном интервале температур для заданной геометрии теплоотдающей поверхности и ее пространственного расположения.

В реальных условиях пускорегулирующие аппараты, тепловой режим которых подлежит анализу, могут отличаться друг от друга и

по конструкции магнитопровода и расположению катушки, формам и размерам, что однако принципиально не меняет общности подхода, хотя конечно может ее усложнить. Некоторые возможные варианты конструкции аппаратов и условных схем теплопередачи между их элементами приведены на рис.2.

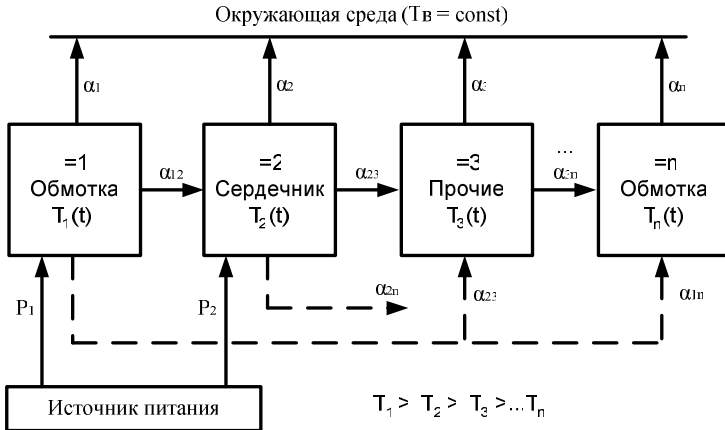


Рис.1 – Условная схема процессов теплопередачи в действующем электрическом аппарате

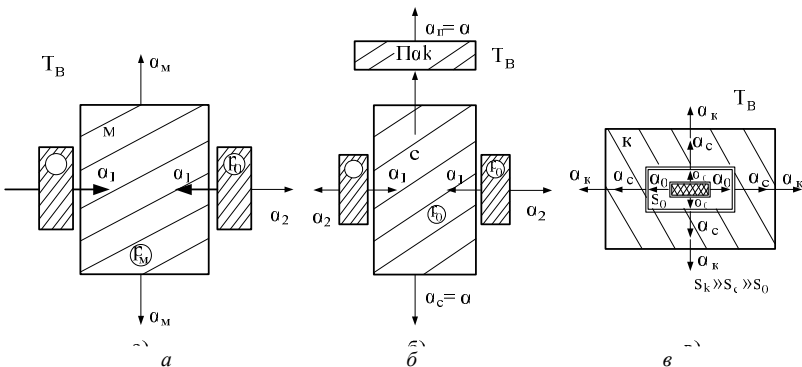


Рис.2 – Схема процессов теплопередачи в действующем электрическом аппарате при разных вариантах устройства:

a – двухэлементный аппарат (o – обмотка, M – магнитопровод); b – трехэлементный аппарат (o – обмотка, c – сердечник, $П$ – пластина); $в$ – закрытое расположение обмотки.

При теоретической оценке коэффициентов теплопередачи должны учитываться следующие соображения. Зазоры между элементами аппарата имеют различные толщины h_3 . Так, зазоры между токоведущими частями (проводом обмотки) и окружающими их деталями (магнитопроводом) могут иметь толщину порядка $h_3 = 1$ мм и более (в зависимости от параметров электрической изоляции). Зазоры между нетоковедущими металлическими частями (например, деталями магнитопровода) могут быть обусловлены качеством их поверхностей, сборкой аппаратов, имеют толщину $h_3 = 0,1$ мм и меньше. В этих случаях основным механизмом передачи тепла через зазоры является теплопроводность, конвекция может играть определенную роль лишь в зазорах сравнительно большой толщины, которые к тому же являются «открытыми», как например на рис.2, а, б, в отличие от «закрытых» зазоров (рис.2, в). Общее выражение для процесса теплопередачи между элементами t, i и k

$$a_{ik} = d_{ik} S_{ik} (T_i - T_k), \quad (2)$$

где S_{ik} – площадь поверхности «теплового контакта» между рассматриваемыми элементами. Используя выражение (1), можно записать для коэффициента теплопередачи α_{ik} в «закрытом» зазоре ($\Delta T \equiv T_k - T_i$, $\Delta l \equiv h_3$, $h \equiv h_3$)

$$d_{ik} = \frac{\lambda_3}{h_3}. \quad (3)$$

Значение коэффициента теплопроводности h_3 зависит от материала зазора $d_3 = 0,01-0,05 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$. Например, для воздуха в указанном выше интервале температур можно принять среднее значение $h_3 = 0,022 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$.

Для расчета $T_i(t)$ следует использовать соответствующие уравнения теплового баланса, последовательно составленные для n элементов аппарата с учетом конкретных процессов поступления тепла в элемент и его расхода. Так, для обмотки аппарата ($i = 1$) это уравнение имеет вид (второе слагаемое в левой части, а также слагаемые, обозначенные многоточием, могут и отсутствовать, как, например, в схеме рис.2, в):

$$c_1 m_1 \frac{dT_1}{dt} + \alpha_1 S_1 (T_1 - T_e) + \alpha_{12} S_{12} (T_1 - T_2) + \dots = P_1. \quad (4)$$

В соответствии с изложенным выше, здесь S_1 – площадь поверхности обмотки контактирующей с окружающей средой (воздухом); S_{12} – площадь «контакта» обмотки с магнитопроводом (сердечником). При определении S_{12} следует учитывать как внешнюю, так и внутреннюю поверхность обмотки. Величины S_1 , S_{12} , как произведения величины $c_1 m_1$ определяются конструктивным исполнением отдельных элементов. Для n элементов система n уравнений типа (4) содержит n неизвестных функций $T_i(t)$ и является замкнутой.

В установившемся тепловом режиме

$$T_1 = const = T_1^{(y)}, \quad T_2 = const = T_2^{(y)} \quad (5)$$

уравнение типа (4) принимает вид:

$$\alpha_1 S_1 (T_1^{(y)} - T_e) + \alpha_{12} S_{12} (T_1^{(y)} - T_2^{(y)}) + \dots = P_1. \quad (6)$$

Заметим, что система уравнений типа (6) может быть использована для уточнения величин α_1 , α_{12} , если измерены T_i .

При решении системы уравнений типа (4), целесообразно перейти к безразмерным параметрам температуры:

$$\frac{T_1}{T_e} \equiv \tau_1, \quad \frac{T_2}{T_e} \equiv \tau_2, \dots, \quad \frac{T_1^{(y)}}{T_e} \equiv \tau_1^{(y)}. \quad (7)$$

Такой переход осуществляется путем почленного деления уравнения (4) на $c_1 m_1 T_e$, в результате получим:

$$\frac{d\tau_1}{dt} + \frac{\alpha_1 S_1}{c_1 m_1} (\tau_1 - 1) + \frac{\alpha_{12} S_{12}}{c_1 m_1} (\tau_1 - \tau_2) + \dots = \frac{P_1}{c_1 m_1 T_e}. \quad (8)$$

В уравнении типа (8) удобно ввести следующие обозначения:

$$\frac{P_1}{c_1 m_1 T_e} \equiv \mathfrak{I}_1^{(1)}, \quad \frac{\alpha_{12} S_{12}}{c_1 m_1} \equiv \mathfrak{I}_1^{(2)}, \quad \frac{\alpha_{12} S_{12}}{c_1 m_1} \equiv \mathfrak{I}_1^{(3)}. \quad (9)$$

Здесь нижний индекс относится к порядковому номеру элемента аппарата (рис.1), а верхний индекс указывает номер процесса теплопередачи от этого элемента. Величины, обратные \mathfrak{I}_1 , в своей совокупности характеризуют тепловую инерционность «выхода» элемента 1. В указанном смысле элемент 1 имеет 1 «вход» и, вообще говоря, от 1 до n «выходов». Например, для ПРА, можно считать, что обмотка обычно имеет не более 2 «выходов» – в окружающую среду и в элемент 2 –

магнитопровод. В свою очередь, элемент 2 имеет два «входа», т.е. поступление тепла в него осуществляется за счет двух тепловых процессов – выделение тепловой мощности P_2 («потери в стали») и теплопередачи от обмотки аппарата. Эти «входы» характеризуются параметрами $\mathfrak{D}_2^{(1)}$ и $\mathfrak{D}_2^{(2)}$ соответственно, определенными формулами типа (9):

$$\frac{P_2}{c_2 m_2 T_g} \equiv \mathfrak{D}_2^{(1)}, \quad \frac{\alpha_{12} S_{12}}{c_2 m_2} \equiv \mathfrak{D}_2^{(2)}. \quad (10)$$

Элемент имеет «выходы» с параметрами

$$\frac{\alpha_2 S_2}{c_2 m_2} \equiv \mathfrak{D}_2^{(3)}, \quad \frac{\alpha_{23} S_{23}}{c_2 m_2} \equiv \mathfrak{D}_2^{(4)}, \quad (11)$$

характеризующими быстроту остывания данного элемента в результате процессов отдачи тепла в окружающую среду (с площади поверхности S_2) и другими элементами с $T_3 < T_2$; $T_4 < T_2, \dots$ с соответствующих контактных поверхностей, площади которых S_{23}, S_{24} . Эти элементы ($i = 3, 4, \dots, n$) являются «пассивными» в том смысле, что в них отсутствуют процессы объемного выделения тепла, т.е. $l_i = 0$, и они получают тепло только от более «горячих» элементов через соответствующие «тепловые контакты».

«Входные» и «выходные» параметры вводятся для них по формулам типа (9)-(11); например, при $\alpha_{13} = 0$ «вход» элемента 3 имеет параметр

$$\frac{\alpha_{23} S_{23}}{c_3 m_3} \equiv \mathfrak{D}_3^{(1)}, \quad (12)$$

характеризующий быстроту нагрева этого элемента за счет передачи тепла от элемента 2-сердечника обмотки (такая ситуация имеет место, например, для пластины П на рис.2, б).

Последовательно составляя уравнения теплового баланса типа (4) в безразмерной форме (8), получим систему линейных дифференциальных уравнений 1-го порядка с постоянными коэффициентами для определения n искомых функций $T_i(t)$ или n -го порядка вида:

$$a \frac{d^{(n)} \tau_1}{dt^{(n)}} + b \frac{d^{(n-1)}}{dt^{(n-1)}} + \dots + c_1 \tau_1 + c_2 = 0, \quad (13)$$

где постоянные a, b, \dots, c_1, c_2 выражаются через величины типа (9)-(12).

Решение этого неоднородного уравнения представляется суммой его частного решения и решения соответствующего однородного уравнения

$$a \frac{d^{(n)}\tau_1}{dt^{(n)}} + b \frac{d^{(n)}\tau_1}{dt^{(n)}} + \dots + c_1 \tau_1 = 0. \quad (14)$$

Очевидно, что в данном случае частное решение уравнения (13) представляет собой установившееся значение, которое выражается формулой

$$\tau_1^{(y)} = \frac{c_2}{c_1}. \quad (15)$$

Вид решения однородного уравнения (14) определяется путем решения характеристического уравнения n -й степени

$$ak^n + bk^{n-1} + ck^{n-2} + \dots + c_1 = 0. \quad (16)$$

Уравнение (16), как правило, имеет n различных действительных отрицательных корней

$$k_1, k_2, \dots, k_n < 0. \quad (17)$$

Поэтому решение уравнения (13) может быть представлено в виде:

$$\tau_i(t) = \frac{T_i(t)}{T_e} = A_1 e^{k_1 t} + A_2 e^{k_2 t} + \dots + A_n e^{k_n t} + T_i^{(y)}. \quad (18)$$

Здесь постоянные A_1, A_2, \dots, A_n подлежат определению путем решения системы алгебраических уравнений, соответствующих начальным условиям:

$$\tau_i(t=0) = \tau_i^{(0)} \left(\equiv \frac{T_i^{(0)}}{T_e} \right), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (19)$$

Обычно на практике $T_i^{(0)} = T_e$, так что $\tau_i^{(0)} = 1$.

Для решения характеристического уравнения (16) необходимо выразить коэффициенты a, b, c, \dots, c_1 через «входные» и «выходные» параметры элементов аппарата \mathcal{E}_i , которые, в свою очередь, определяются через конструктивные параметры по формулам типа (9)-(12). Выражения для a, b, \dots, c_1 составляются по следующим общим правилам (для любого элемента аппарата):

1) коэффициент a полагается равным единице:

$$a=1; \quad (20)$$

2) коэффициент b представляет собой сумму всех «входных» и «выходных» параметров (9)-(12) для данной конструкции аппарата, за исключением $\mathcal{E}_1^{(1)}$ и $\mathcal{E}_2^{(1)}$, т.е. величин, содержащих P_1 и P_2 :

$$b = \mathcal{E}_1^{(2)} + \mathcal{E}_1^{(3)} + \dots + \mathcal{E}_2^{(2)} + \mathcal{E}_2^{(3)} + \dots + \mathcal{E}_3^{(1)} + \dots; \quad (21)$$

3) коэффициент c представляет собой сумму парных произведений всех величин (9)-(12), за исключением: а) произведений, содержащих $\mathcal{E}_1^{(1)}$ или $\mathcal{E}_2^{(1)}$; б) произведений величин, относящихся к одному и тому же элементу например, $\mathcal{E}_1^{(2)}$, $\mathcal{E}_1^{(3)}$; в) произведений величин, относящихся к упомянутым выше «тепловым каналам» (например, $\mathcal{E}_3, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$ и т.п.):

$$C = \mathcal{E}_1^{(2)}\mathcal{E}_2^{(2)} + \mathcal{E}_1^{(2)}\mathcal{E}_2^{(3)} + \dots + \mathcal{E}_1^{(3)}\mathcal{E}_2^{(3)} + \dots + \mathcal{E}_2^{(2)}\mathcal{E}_3^{(1)} + \dots; \quad (22)$$

4) коэффициент d представляет собой сумму тройных произведений всех величин (9)-(12), за исключением произведений, содержащих: а) величин \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 ; б) величин, относящихся к одному и тому же элементу; в) величин, относящихся к «тепловым каналам».

Последующие коэффициенты уравнения (16), включая c_1 , образуются аналогичным образом. Заметим, что \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 , содержащие P_1 и P_2 , входят только в выражения для c_2 , которые, естественно, различны для разных элементов и аппаратов. Значение c_2 может использоваться для определения величины $T_i^{(y)}$ по формуле типа (15)

$$\tau_i^{(y)} = \frac{c_2(i)}{c_1}. \quad (23)$$

Однако эти величины, как уже упоминалось выше, значительно проще определить путем решения алгебраической системы уравнений, которая получается из исходной системы уравнений типа (8) при

$$\frac{d\tau_1}{dt}, \frac{d\tau_2}{dt} \dots = 0.$$

1.Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 720 с.

2.Краснопольский А.Е., Соколов В.Б. ПРА для разрядных ламп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.

3.Фугенфиров М.И. Электрические схемы с газоразрядными лампами. – М.: Энергия, 1974. – 370 с.

4.Айзенберг Ю.Б. Справочная книга по светотехнике. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 525 с.

Получено 21.01.2009

УДК 628.987 : 628.971

А.В.САПРЫКА, П.П.РОЖКОВ, кандидаты техн. наук

Харьковская национальная академия городского хозяйства

В.П.ТАТЬКОВ

КП «Горсвет», г.Харьков

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Рассматривается надежность системы наружного освещения и повышение эффективности работы осветительного комплекса города.

Современная система наружного освещения города представляет собой сложный комплекс, состоящий из трансформаторных подстанций, шкафов питания, линий электропередач, осветительных установок. Сегодня система наружного освещения г.Харькова включает в себя более 65 тыс. световых приборов, из них осветительные установки с лампами ДНаТ составляют 45944 шт. и РВЛ – 19939 шт. Протяженность сетей составляет 3875,136 км, из них кабельных – 1150 км (422,58 км – кабельные в земле), шкафов – 707 шт., что обуславливает требования к надежности электроснабжения. Надежность определяется способностью объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования [1-3]. Процесс изменения параметров рабочего режима в системе наружного освещения является, как правило, случайным. Это связано прежде всего со случайным характером изменения нагрузок и соответствующим случайным характером изменения качества электроэнергии. Поэтому анализ надежности системы наружного освещения города является актуальным.

Целью настоящей работы является оценка показателей надежности системы наружного освещения г.Харькова.

В соответствии с электрической схемой наружного освещения, из всей совокупности оборудования и элементов конструкции можно выделить технологическую цепь, которую условно назовем базовым комплектом (БК) системы наружного освещения. Он содержит в себе последовательно включенные трансформаторную подстанцию, шкаф питания, линию электропередачи, опору, кронштейн и осветительный прибор (рис.1).

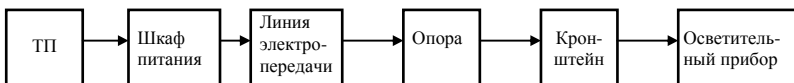


Рис.1 – Структурная схема базового комплекта системы городского освещения